基于量化调制水印的图博档视频资源版权保护策略研究*

朱　光[1, 2]　丰米宁[1]

[1](南京信息工程大学经济管理学院　南京 210044)

[2](南京大学信息管理学院　南京 210093)

摘要: 【目的】设计网络环境下透明性和实时性更好的视频水印算法, 保护图博档(图书馆、博物馆、档案馆)视频资源的版权。【应用背景】保证视频资源的视觉效果, 满足图博档视频资源版权保护的实时性需求。【方法】定义8位水印图像的像素值为索引信息, 交替嵌入索引信息和水印信息, 对水印图像进行Arnold置乱, 运用量化调制的方法将置乱后的水印信息嵌入密钥随机选择的视频区域中。【结果】基于量化调制的视频水印算法可以对视频资源进行有效的版权验证和鉴别, 透明性较好, 对于视频操作具有较强的鲁棒性, 相关系数保持在 0.8 以上。水印提取时间 3s 左右, 具有良好的实时性。【结论】本研究有助于图博档视频资源的版权保护, 促进大数据环境下图博档信息资源共享和服务融合。

关键词: 图博档　视频资源　版权保护　水印　量化调制　实时性

分类号: G250.76

1 引　言

随着大数据时代的到来, 网络环境下数字信息资源的共建共享已成为文献收藏和信息服务机构工作的重点[1]。图书馆、博物馆、档案馆纷纷将自身馆藏资源数字化, 并通过网络平台进行整合和传播, 极大提高了自身的信息服务质量和用户的信息获取能力。得益于数字信息技术的发展和高速网络的普及, 生动形象的数字视频逐渐成为信息资源的主流类型。然而, 数字视频资源传播和共享进一步深入的同时, 数字视频的版权受到了前所未有的冲击。在大数据共享环境下, 非法团体和个人可以不受限制地编辑、复制、传播视频资源, 这给资源原创作者和供应商的知识产权造成了极大的侵害。如何有效保护数字视频资源的合法版权, 成为亟待解决的问题。本文将数字水印技术应用于图书馆、博物馆和档案馆数字视频资源的版权保护中, 结合图博档视频资源的特征, 针对网络环境下版权保护的实时性需求, 提出一种基于离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)系数量化调制的视频水印算法, 有效地解决了现有视频水印技术在执行效率和实时性上存在的不足, 为数字视频资源的版权保护提供了新的技术思路和解决方案。

2 研究现状

数字水印技术是近年来兴起的信息安全和版权保护技术, 将版权标识(即数字水印)通过空域变换或者时域变换嵌入至数字载体的特定区域中。版权鉴别时, 提取水印信息作为证据, 从而维护版权所有者的合法权益[2]。目前关于数字水印技术的研究主要集中于图像水印领域[3-6], 而数字视频是由时间轴上连续的帧图像组合构成, 因此视频水印与图像水印在水印性能和设计模式上有很多的共同点。然而, 图像水

通讯作者: 朱光, ORCID: 0000-0003-4749-8603, E-mail: guangguang4992@sina.com。

*本文系国家社会科学重大项目"图书、博物、档案数字化服务融合研究"(项目编号: 10&ZD134)、国家自然科学基金项目"信息生命周期视角下的大数据隐私风险评估和溯源问责机制研究"(项目编号: 71503133)和江苏高校品牌专业建设工程资助项目的研究成果之一。

印只需考虑静止图像对水印算法的要求，视频水印还需要考虑时间域的因素，因此视频水印算法除了对常规的图像攻击保持鲁棒性外，还需要抵抗帧插入、帧删除、帧重组等视频攻击。本文根据水印信息嵌入视频编码格式的不同将视频水印算法分为三类[7]，如图 1 所示：

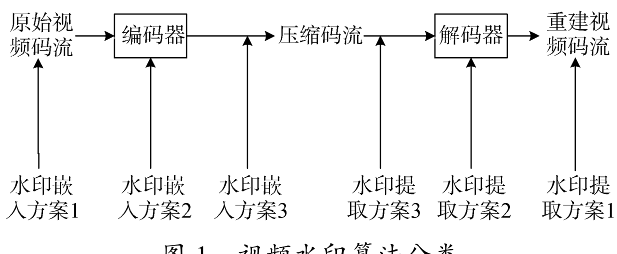


图 1　视频水印算法分类

(1) 基于原始视频码流的水印算法：该类算法将水印标识嵌入至原始视频资源中，再对视频进行压缩编码。李淑芝等[8]提出一种基于帧内预测的可逆视频水印算法，利用差值扩展将视频特征作为水印标识嵌入到所选系数，具有较好的鲁棒性；Xu 等[9]提出一种环状嵌入的视频水印算法，运用直方图平移将运动矢量信息作为水印标识嵌入到视频的量化余弦系数中，可以增强算法的隐蔽性和安全性。然而，该类视频水印算法会显著增加视频资源的数据容量，在水印信息的嵌入和提取过程中，视频资源的质量也会有一定程度的下降。

(2) 基于视频编码的水印算法：该类算法在视频编解码的过程中对水印信息进行嵌入和提取，优点在于不会额外增加视频的数据容量，有效保障视频资源的视觉效果。比较具有代表性的是许拔等[10]提出的一种基于 LDPC 码的自适应视频水印算法。但是，该类算法水印信息的嵌入和提取需要一个完整的编码和译码过程，因此算法的实时性较差。

(3) 基于压缩域的水印算法：该类算法是近年来研究的热点，首先对原始视频进行压缩(如 MPEG 压缩)，然后将水印信息嵌入至压缩后的视频资源中。蒋刚毅等[11]提出一种无误差漂移的压缩域视频水印算法，通过调制残差系数与水印模板之间的正负相关性，将水印嵌入子块系数上，满足水印对透明性和鲁棒性的要求；Tanima 等[12]提出一种基于高效视频编码的视频盲水印算法，该算法可以有效抵抗滤波、压缩和噪声攻击，并通过随机密钥保证算法的安全性；Pejman 等[13]提出一种量化分解和熵模型的自适应视频水印算法，运用熵模型计算视频序列的运动信息，并通过量化分解获取人眼视觉屏蔽阈值，以此作为水印嵌入的最大强度，该算法对视频帧操作、添加噪声和压缩攻击均能保持较高的鲁棒性。该类算法的优点在于水印信息的嵌入和提取不再需要编码和译码，因此视频资源质量保持较好，但算法复杂度会增加，执行效率较低。

综上所述，现有视频水印算法计算复杂度较高，难以满足网络环境下版权鉴别的实时性要求，不利于在图书馆、博物馆和档案馆等信息服务机构进行推广和应用。与此同时，多数算法并没有考虑到图博档视频资源分辨率较低、格式单一、容量较小的特点，应用领域不具有针对性。因此，本文在相关研究的基础上，从算法有效性和实时性的角度出发，设计了一种基于原始视频帧的扩频水印算法，首先将二值水印图像扫描为一维序列，利用扩频系数将其转换为与原始视频帧大小相同的矩阵，再通过幅度调制的方式嵌入水印信息。在保证视频质量的前提下，算法具有较高的执行效率，对常见的视频攻击也有着较强的鲁棒性。

3　算法设计

本文设计的视频水印算法可以从任一视频帧中提取水印信息，并同时抵抗帧插入、帧去除等恶意攻击，因此需要在视频资源中同步嵌入索引信息，并将索引信息与水印交叠嵌入，如图 2 所示。首先在视频资源中随机选取一起始视频帧，嵌入索引信息，并在后一帧中嵌入水印信息，以此类推，重复嵌入。

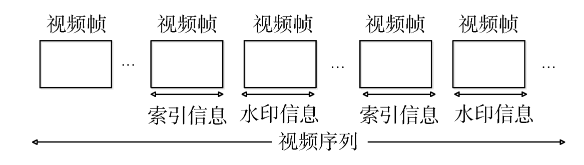


图 2　索引信息和水印信息交替嵌入

3.1　水印嵌入

采用 DCT 系数调制的方法嵌入水印信息，分别计算在 4×4 DCT 分块中不同系数的失真率，选择失真率最小的系数作为水印信息的嵌入位置[14]。嵌入流程如图 3 所示。

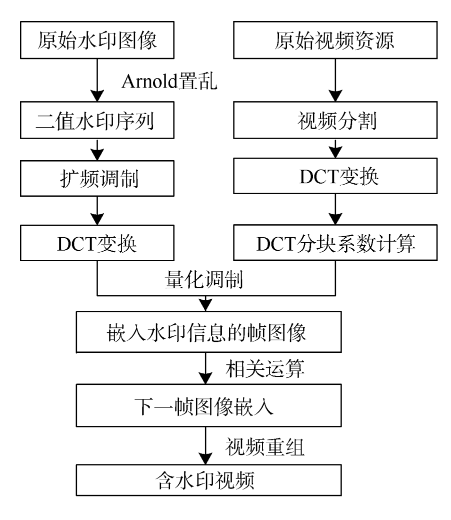


图 3　水印信息嵌入流程

定义二值水印图像为 $W_{K\times L}$，视频帧图像的大小为 $M\times N$，扩频嵌入系数为 cr，则每一视频帧中可以嵌入的水印信息容量为 $M\times N/cr=Num$。定义 8 位水印图像的像素值作为索引信息，因此需要 $(K\times L)/(Num-8)$ 个视频帧嵌入完整的水印信息，水印嵌入的具体步骤如下:

(1) 对二值水印图像 $w(i,j)$ 进行 Arnold 置乱(密钥为 K_1)以保证水印信息的安全性[15]，并将置乱后的图像映射为二值水印序列 $w(i)\in(0,1)(1\leqslant i\leqslant(K\times L))$。其中，每隔 $(Num-8)$ 个 $w(i)$ 嵌入对应的索引信息;

(2) 利用扩频系数 cr 将一维水印序列映射为视频帧同样大小的扩频水印矩阵，对扩频矩阵进行 4×4 分块，再对每一子块进行 DCT 变换;

(3) 将原始视频资源分割为帧图像，并对每一幅帧图像进行 DCT 变换。利用密钥 K_2 选择 4×4 DCT 子块用于水印嵌入，并计算得到失真率最小的 DCT 系数 r;

(4) 为了使水印算法具有较强的鲁棒性，利用量化调制的方法嵌入水印信息[15]:

$$\text{If}\quad w(i)=1,\quad \begin{cases} r=r-\mathrm{mod}(r,Q)-Q/4 & \text{if } \mathrm{mod}(r,Q)\leqslant Q/4 \\ r=r-\mathrm{mod}(r,Q)+3Q/4 & \text{if } \mathrm{mod}(r,Q)>Q/4 \end{cases} \tag{1}$$

$$\text{If}\quad w(i)=0,\quad \begin{cases} r=r-\mathrm{mod}(r,Q)+Q/4 & \text{if } \mathrm{mod}(r,Q)<3Q/4 \\ r=r-\mathrm{mod}(r,Q)+5Q/4 & \text{if } \mathrm{mod}(r,Q)\geqslant 3Q/4 \end{cases} \tag{2}$$

其中，mod 表示求余运算，Q 为量化步长，r 为 DCT 系数，$w(i)$ 为二值水印信息。

(5) 对相邻视频帧进行相关性运算，若相关系数大于阈值 T，则在下一帧中嵌入同样的水印信息，若相关系数小于设定的阈值 T，则在下一视频帧中嵌入下一组水印信息。

3.2　水印提取

本文设计的视频水印算法是盲水印算法，提取水印信息时不需要原始视频资源，具体步骤如下:

(1) 为了去除视频信号自身的相关性，首先对嵌入水印信息的视频 V_i 进行巴特沃斯滤波，得到滤波后的视频序列 $\hat{V}_i$[16];

(2) 利用密钥 K_2 确定嵌入水印信息的视频区域(4×4 子块);

(3) 对水印信息的嵌入区域进行 DCT 变换，计算失真率最小的 DCT 系数 r'，水印信息提取规则如下:

$$\begin{cases} W'(i,j)=1 & \text{if } \mathrm{mod}(r,Q)>Q/2 \\ W'(i,j)=0 & \text{if } \mathrm{mod}(r,Q)\leqslant Q/2 \end{cases} \tag{3}$$

(4) 根据 8 位图像像素值的索引系数重排水印信息，并用密钥 K_1 对水印信息进行 Arnold 逆置乱，即可得到最终的水印图像。

4　实验结果及分析

以 Matlab 2010 为仿真实验平台，对多组视频资源进行水印算法的有效性验证。选取具有代表性的南京图书馆视频资源库中的京剧视频“乾隆断案”、“花木兰”、“吕布试马”、“红娘”，南京博物院视频展示中的“江苏古代文明展”、“珍宝馆”、“陶艺馆”，以及南通博物苑馆藏展览中的“孔雀明王像”、“牡丹纹瓶”、“玉壶春瓶”共 10 组视频为测试视频，视频格式为 wmv，视频帧截图如图 4 所示。

4.1　安全性分析

水印算法安全性的高低应取决于密钥，而不依赖于算法。本文运用密钥 K_1 进行 Arnold 置乱，在不知晓 K_1 的情况下，无法生成正确的版权信息。利用密钥 K_2 选择水印信息的嵌入区域，恶意攻击者或盗版人员在不知晓 K_2 的情况下无法进行水印攻击。因此本文设计的视频水印算法的安全性完全依赖于密钥 K_1 和 K_2，算法流程可以全部公开。

4.2　可行性分析

本文以“孔雀明王像”为原始视频，运用本文设计的水印算法进行水印嵌入及版权信息的提取实验，如图 5 所示。实验结果表明，本文提出的视频水印算法在实践应用中具有可行性，可以清晰地提取水印信息，确认版权归属，同时具备较高的实施效率。



(a) 乾隆断案　(b) 花木兰　(c) 吕布试马　(d) 红娘　(e) 江苏古代文明展

(f) 珍宝馆　(g) 陶艺馆　(h) 孔雀明王像　(i) 牡丹纹瓶　(j) 玉壶春瓶

图 4　测试视频



南京
大学

(a) 嵌入水印的视频帧　(b) 提取的水印信息



(c) 版权鉴别结果

图 5　可行性分析

4.3　透明性分析

为了进一步验证本文水印方案在版权保护实践应用中的有效性，需要对水印算法的透明性、鲁棒性和实时性进行对比分析。透明性是指视频资源在嵌入水印信息的前后，其视觉质量不能有显著下降。透明性的客观评价指标采用峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)，PSNR 值越高，透明性越好。若将 $I(i,j)$ 定义为某一视频帧，$I'(i,j)$ 表示嵌入水印后的视频帧，则 PSNR 的计算公式为[17]:

$$PSNR = 10\lg\frac{MN\max[(I(i,j))^2]}{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[I(i,j)-I'(i,j)]^2} \tag{4}$$

图 6 显示了嵌入水印前后视频第 4 帧显示的图像，可以看出水印嵌入前后视频质量没有受到显著影响，人眼无法感知水印信息的存在。

与其他文献算法透明性的比较结果如图 7 所示，可以看出本文算法具有一定的优越性。



(a) 原始视频第4帧图像

(b) 嵌入水印后的视频第4帧图像

图 6　透明性分析

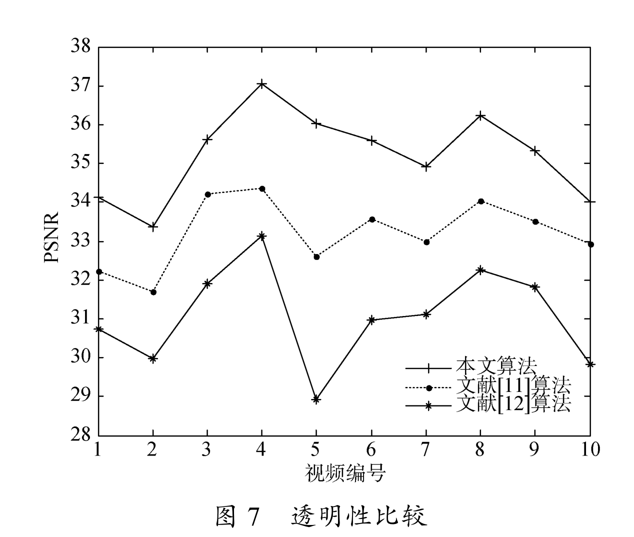


图 7　透明性比较

4.4　鲁棒性分析

鲁棒性是指视频资源受到各类视频操作和攻击之后，仍能提取出水印标识信息，以验证版权归属[18]。鲁棒性的评价指标为相关系数(Normalized Correlation, NC)，是指原始水印图像与提取水印图像的相似度。定义 W(i, j) 为原始水印图像，W'(I, j)表示提取出的水印图像，则 NC 的计算公式为：

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} W(i,j)W'(i,j)}{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} [W(i,j)]^2} \tag{5}$$

本文选取常见的 8 种视频攻击验证本文算法的鲁棒性，攻击类型如表 1 所示，10 组测试视频受到不同攻击后的相关系数如表 2 所示。以测试视频“乾隆断案”为例，遭受视频攻击后，仍可以提取较清晰的水印图像，如图 8 所示，实验结果表明，本文设计的视频水印算法对 MPEG 压缩、滤波、噪声攻击、视频帧操作等常见的视频攻击具有较强的鲁棒性。

表 1　攻击类型

编号	攻击	编号	攻击
1	MPEG 压缩(QF=75%)	5	帧交换
2	高斯滤波	6	帧裁剪
3	添加高斯噪声(σ=0.06)	7	帧删除
4	添加椒盐噪声(σ=0.06)	8	帧平均

表 2　测试视频遭受攻击后的相关系数

视频	攻击编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.991	0.922	0.897	0.889	0.826	0.832	0.809	0.817
2	0.974	0.909	0.891	0.875	0.823	0.823	0.787	0.805
3	0.953	0.913	0.884	0.861	0.811	0.818	0.794	0.784
4	0.992	0.917	0.889	0.856	0.813	0.834	0.788	0.793
5	0.961	0.921	0.869	0.849	0.799	0.824	0.779	0.812
6	0.958	0.918	0.878	0.885	0.808	0.818	0.811	0.805
7	0.993	0.925	0.892	0.863	0.813	0.826	0.802	0.819
8	0.984	0.914	0.881	0.877	0.824	0.814	0.775	0.808
9	0.977	0.916	0.863	0.855	0.821	0.822	0.805	0.813
10	0.962	0.913	0.868	0.851	0.826	0.817	0.801	0.796

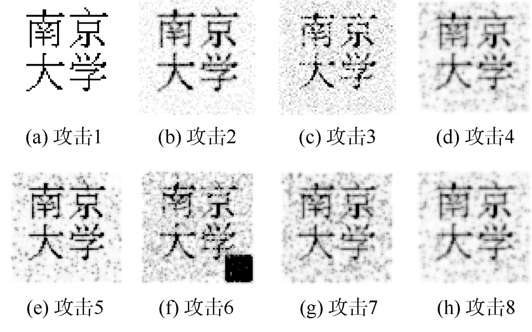


图 8　遭受视频攻击后提取的水印图像

以测试视频“乾隆断案”为例，比较本文算法与文献[11-12]水印算法的鲁棒性，如图 9 所示。实验结果表明，文献[11]算法具有更好的鲁棒性，但算法复杂度较高，透明性和实时性不如本文算法。

4.5　实时性分析

分析 10 组测试视频水印信息的提取时间，与文献[11-12]进行比较，实验结果如图 10 所示，比较结果表明本文算法具有更好的实时性，更适合在网络环境下应用实现。

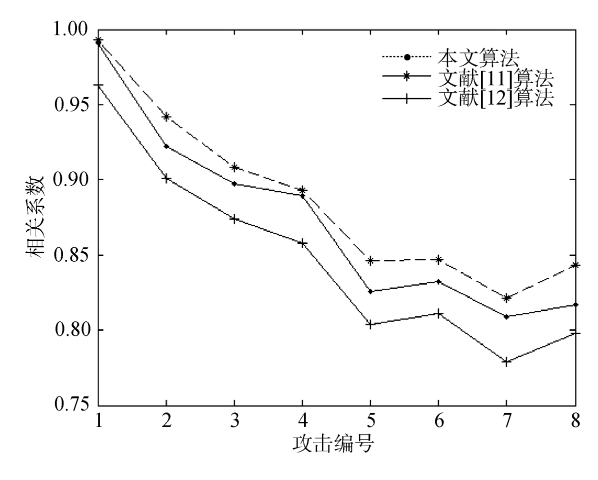


图 9　鲁棒性比较

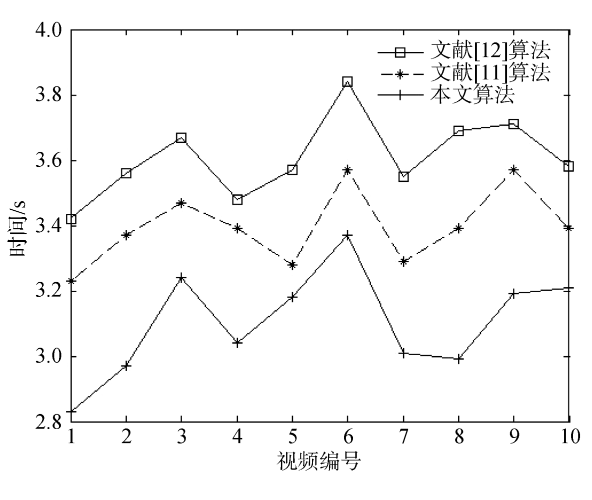


图 10　实时性比较

5　结　语

针对大数据共享环境下图博档视频资源版权保护的需求，本文设计了一种基于量化调制的视频水印算法，交替嵌入索引信息和水印信息，对水印信息进行 Arnold 置乱并通过幅度调制的方法嵌入密钥随机选择的视频区域。仿真实验结果表明，本文提出的视频水印算法安全性依赖于密钥，在不降低视频资源质量的前提下，可以对其进行有效的版权保护和验证，对常见的视频攻击也具有较强的鲁棒性。与此同时，较低的算法复杂度可以保证网络环境下的版权验证的实时性。

尝试设计水印算法应用于多种视频格式，进一步提高算法鲁棒性，以及引入 Web Service 和 Mashup 架构体系建立水印技术应用的 API 接口是未来研究的内容。

参考文献：

[1] 朱学芳. 图博档信息资源数字化建设及服务融合探讨[J]. 情报资料工作, 2011(5): 57-60. (Zhu Xuefang. On the Digitalized Construction and Service Integration of the Information Resources of Libraries, Museums and Archives [J]. Information and Documentation Services, 2011(5): 57-60.)

[2] Liu H, Xiao D, Zhang R, et al. Robust and Hierarchical Watermarking of Encrypted Images Based on Compressive Sensing [J]. Signal Processing: Image Communication, 2016, 45(7): 41-51.

[3] Ahmad J J, Li S, Thavot R, et al. Secure Computing with the MPEG RVC Framework[J]. Signal Processing: Image Communication, 2013, 28(10): 1315-1334.

[4] 郝世博, 朱学芳. 面向图博档的分块压缩感知图像零水印算法[J]. 现代图书情报技术, 2014(6): 87-93. (Hao Shibo, Zhu Xuefang. An Image Zero-Watermarking Algorithm Using Block Compressive Sensing for Libraries, Museums and Archives[J]. New Technology of Library and Information Service, 2014(6): 87-93.)

[5] 朱光. 基于零水印的图博档彩色图像资源版权保护策略研究[J]. 现代图书情报技术, 2015(12): 87-93. (Zhu Guang. Copyright Protection Scheme of Color Images for Libraries, Museums and Archives Based on Zero-Watermarking[J]. New Technology of Library and Information Service, 2015(12): 87-93.)

[6] Khaled L, Ahmed R, Khalil Z. Comments on "Homomorphic Image Watermarking with a Singular Value Decomposition Algorithm"[J]. Information Processing & Management, 2016, 52(4): 644-645.

[7] 楼偶俊, 王相海, 王钲旋. 抗几何攻击的量化鲁棒视频水印技术研究[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(7): 1211-1218. (Lou Oujun, Wang Xianghai, Wang Zhengxuan. Research on Quantization-Based Robust Video Watermarking Technique Against Geometrical Attacks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2007, 44(7): 1211-1218.)

[8] 李淑芝, 张翔, 邓小鸿. 基于模式特征的 H. 264 /AVC 可逆视频水印[J].中国图象图形学报, 2015, 20(10): 1285-1296. (Li Shuzhi, Zhang Xiang, Deng Xiaohong. Reversible Video Watermarking Algorithm for H. 264 /AVC Based on Mode Feature [J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(10): 1285-1296.)

[9] Xu D W, Wang R D, Shi Y Q. An Improved Reversible Data Hiding-Based Approach for Intra-frame Error Concealment in H. 264 /AVC [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(2): 410-422.

[10] 许拔, 张仲明, 何英亮, 等. 基于 LDPC 码的自适应视频水印算法研究[J].信号处理, 2010, 26(3): 441-447. (Xu Bo,

Zhang Zhongming, He Yingliang, et al. A Study of Adaptive Video Watermarking Algorithm Based on Low-Density Parity-Check Codes [J]. Signal Processing, 2010, 26(3): 441-447.)
[11] 蒋刚毅, 李文锋, 郁梅, 等. H.264/AVC 压缩域鲁棒视频水印[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 260-270. (Jiang Gangyi, Li Wenfeng, Yu Mei, et al. Robust Video Watermarking in H.264/AVC Compressed Domain [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 260-270.)
[12] Tanima D, Hari P G. A Robust Watermarking Framework for High Efficiency Video Coding (HEVC) – Encoded Video with Blind Extraction Process [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38(7): 29-44.
[13] Pejman R, Salma S, Mary A, et al. Robust Non-Blind Color Video Watermarking Using QR Decomposition and Entropy Analysis [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38(7): 838-847.
[14] Xu D W, Wang R D, Wang J C. A Novel Watermarking Scheme for H.264 AVC Video Authentication [J]. Signal Processing: Image Communication, 2011, 26(6): 267-279.
[15] Ghazy R A, Amoon M, Abdallah H A, et al. Block Based Embedding of Encrypted Watermarks Using Singular Value Decomposition [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(20): 6299-6304.
[16] Li L, Dong Z H, Lu J F, et al. An H. 264/AVC HDTV Watermarking Algorithm Robust to Camcorder Recording[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2015, 26(1): 1-8.
[17] Hu H T, Hsu L Y. Robust, Transparent and High-capacity Audio Watermarking in DCT Domain [J]. Signal Processing, 2015, 109(4): 226-235.
[18] 付剑晶, 王珂. 基于第一主成分方向稳定性的图像零水印[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(7): 756-769. (Fu Jianjing, Wang Ke. Image Zero-watermark Based on Direction Stability of First Principal Component Vector [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(7): 756-769.)

作者贡献声明:

朱光: 算法设计, 系统开发, 论文撰写;
丰米宁: 论文修改, 数据整理。

利益冲突声明:

所有作者声明不存在利益冲突关系。

支撑数据:

支撑数据见期刊网络版 http://www.infotech.ac.cn。
[1] 朱光. 视频水印.txt. 水印算法相关代码.
[2] 朱光, 丰米宁. 透明性实验数据.doc. 透明性实验数据.
[3] 朱光, 丰米宁. 鲁棒性实验数据.doc. 鲁棒性实验数据.
[4] 朱光, 丰米宁. 实时性实验数据.doc. 实时性实验数据.

收稿日期: 2016-06-06
收修改稿日期: 2016-07-01

A New Video Watermarking Technology for Copyright Protection

Zhu Guang[1, 2]　Feng Mining[1]
[1](School of Economics and Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)
[2](School of Information Management, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: [**Objective**] Proposed a new video watermarking algorithm to protect the copyright of online video resources from Libraries, Museums and Archives(LAM). [**Context**] The proposed algorithm can maintain the original visual quality of the videos, as well as meet the real-time demand of online copyright protection. [**Methods**] First, we defined the pixel values of 8-bit watermark image as index. Second, we embedded the index and actual watermark information to the images alternately, and then encrypted the watermark with Arnold transform technique. Finally, the watermark was embedded into video segments randomly selected by the keys with the help of quantization modulation. [**Results**] The proposed algorithm identified and verified the copyright message of the protected videos effectively, while the coefficient of NC was above 0.8, and the watermark could be extracted in about three seconds. [**Conclusions**] The new method could protect video copyrights, and promote the information sharing and service integration of LAM resources.

Keywords: LAM　Video resources　Copyright protection　Watermarking　Quantization modulation　Real-time